

Vulnerabilidad sísmica y toma de decisiones

Juan José Egozcue

Gonzalo Simarro

Pedro D. Díez

E. T. S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Departamento de Matemática Aplicada III
Universitat Politècnica de Catalunya
Jordi Girona Salgado 1-3, 08034 Barcelona, España

RESUMEN

En la última década se ha utilizado y estudiado extensamente la vulnerabilidad de obras civiles y sistemas diversos frente a acciones sísmicas. Sin embargo la finalidad de los estudios realizados es muy diversa y ha dado lugar a una cierta confusión acerca de su significado y definición. Naturalmente, las diferentes caracterizaciones de la vulnerabilidad dan lugar a también diferentes metodologías de estudio que no siempre son compatibles.

Se pretende realizar un análisis de la definición de vulnerabilidad sísmica en un contexto de toma de decisiones bayesiano. Para ello se presentan tres casos cualitativamente diferentes de toma de decisiones en los que la vulnerabilidad sísmica juega un papel importante y que corresponden a situaciones de complejidad creciente: las decisiones normativas de diseño; las decisiones a tomar sobre primas de seguros frente a riesgo sísmico y, finalmente, las que pueden orientar los sistemas de alarma y protección frente a sucesos sísmicos destructivos.

Los tres casos analizados corresponden a tres esquemas de decisión diferentes llamados respectivamente: *a priori*, *a posteriori* y *preposterior*. En cada uno de ellos la definición de vulnerabilidad depende del concepto de utilidad (coste-beneficio) que es necesario considerar, de la caracterización de los estados aleatorios que afectan a cada situación y de la escala a la que se refiere la decisión. Los tres casos que se revisan dan lugar a la mayor parte de los conceptos de vulnerabilidad sísmica que se utilizan.

Se concluye que no es conveniente estudiar la vulnerabilidad sísmica sin considerar el contexto de toma de decisiones en el que se pretende utilizarla y, al mismo tiempo, se resalta la necesidad de profundizar tanto en los aspectos metodológicos como de estimación para optimizar la legislación y la mitigación de daños producidos por terremotos.

ABSTRACT

Vulnerability of civil structures and systems under seismic actions have been extensively used and studied in the last decade. However, the goals of those studies are very diverse and it have caused some confusion on the meaning and definition of vulnerability. Naturally, different scopes of vulnerability lead to different methodologies in its study which may be incompatible.

The present aim is to analyse the definition of seismic vulnerability in the framework of Bayesian decision making. Three different examples of decision making related to seismic vulnerability, which are qualitatively different, guide the discussion. They have an increasing complexity: decisions on normative seismic design; decisions on insurances against seismic risk and, finally, those decisions that should be taken to lead alarm, mitigation and rescue systems for seismic disasters.

The three analysed examples correspond to three different decision making schemes, respectively named: *a priori*, *a posteriori* and *preposterior*. In each case the definition of seismic vulnerability depends on the concept of considered utility (cost-benefit), on the involved random states and the scale in which the phenomena are considered. Most of the concepts associated with seismic vulnerability are reviewed through these three examples.

A conclusion is that seismic vulnerability studies should consider the associated decision making problem. Simultaneously, the study of methodological and estimation aspects on vulnerability are remarked in order to improve both guidelines for seismic design and disaster mitigation.

1 INTRODUCCIÓN

Los desastres de origen natural han atraído un creciente interés en todos los ámbitos en las últimas décadas debido a sus consecuencias económicas y sociales. La creciente complejidad de la sociedad moderna hace que el colapso o disfunción de determinados elementos infraestructurales tengan consecuencias negativas que afectan a la sociedad entera, lo que las convierte en fuentes de riesgo que no son comparables a las situaciones de riesgo que se vivieron en siglos pasados. Entre esos desastres de origen natural los terremotos suscitan una considerable inquietud tanto por su relativa imprevisibilidad como por sus efectos destructivos.

Estas circunstancias han llevado a un extenso estudio de la sismicidad de la tierra en las últimas cinco décadas. Pero en la última década se ha empezado a prestar una especial atención a los estudios de riesgo sísmico, para lo que es imprescindible el estudio de la vulnerabilidad de los sistemas sometidos a las acciones sísmicas.

Sin embargo la definición y cuantificación de la vulnerabilidad son objeto de diversas controversias fruto de las diferentes metodologías utilizadas para su estudio y de los objetivos más o menos explícitos que se persiguen. Un ejemplo de esta diversidad puede observarse comparando Barbat et al. (1996), Benedetti et al. (1988), Benedetti y Petrini (1984), Cochrane y Schaad (1992), Kappos et al. (1995), Noceski y Petrovsky (1994), Singhal y Kiremidjian (1996), Yépez et al. (1995), que constituyen solamente una pequeña muestra de autores.

El objetivo que aquí se plantea es analizar el concepto de vulnerabilidad sísmica en el contexto de la toma de decisiones sometidas a incertidumbre. Para ello se tipificarán tres situaciones diferentes que incluyen la mayor parte de las aplicaciones que se persiguen en los estudios de vulnerabilidad; y se las analizará desde el punto de vista del esquema de decisión bayesiano (Schlaifer, 1969; Benjamin and Cornell, 1970). Los esquemas que se introducirán pretenden simplificar las situaciones estudiadas manteniendo la flexibilidad deseable para que puedan servir de esquemas metodológicos en situaciones concretas y, por tanto, mucho más complejas.

Se tratará en primer lugar de las decisiones de carácter normativo para el diseño sísmico. Esta situación corresponde al esquema más simple de decisiones *a priori*. La definición de vulnerabilidad en este caso corresponde a una modelización probabilística que exige algunas definiciones previas de lo que llamaremos parámetros de diseño.

En segundo lugar, se estudiarán las decisiones que pueden ser necesarias para el establecimiento de primas de seguros sobre bienes sometidos a riesgo sísmico. Esta situación es similar a la que se presenta a un municipio para decidir reparar, mantener o demoler edificios o infraestructuras. Estas decisiones corresponden a esquemas de decisión bayesiana *a posteriori*; en ellos se prevé la realización de inspecciones de la infraestructura de que se trate para mejorar el conocimiento de sus prestaciones. El esquema *a posteriori* se diferencia del *a priori* por la recogida de información adicional sobre el edificio o infraestructura y la correspondiente actualización de su vulnerabilidad. En estos casos la adquisición de la información da dinamismo a la decisión seleccionada, que puede variar dependiendo del resultado de la inspección.

El tercer caso que se presenta trata de las decisiones que deben tomarse por los responsables de protección civil y otros servicios de emergencia en caso de un accidente sísmico. Se trata de decisiones de despliegue de efectivos e intervención de los mismos en las zonas afectadas por un accidente sísmico. Las características de estas situaciones exigen una rápida toma de decisiones para la mitigación de los efectos de los terremotos, por lo que las mismas deben tomarse en tiempo real, a medida que se reciben informaciones de los daños producidos o las situaciones de emergencia. El esquema de decisión debe ser, por tanto, totalmente dinámico y afecta no sólo a los despliegues de socorro y mitigación, sino también a la forma en que se puede recabar nueva información. Los esquemas de decisión de estas características se han denominado *preposteriores* en el contexto de la decisión bayesiana.

En el apartado 2 se introducen conceptos básicos acerca de la vulnerabilidad y la toma de decisiones en contexto de incertidumbre desde el punto de vista bayesiano. A continuación los apartados 3, 5 y 6 presentan de forma simplificada las tres situaciones mencionadas y las diferentes formas que la vulnerabilidad adopta en cada caso. En la sección 4 se presenta un ejemplo preliminar de decisión normativa de diseño para la ciudad de Barcelona (España) que ilustra la flexibilidad de la metodología propuesta.

2 CONCEPTOS BÁSICOS DE LA VULNERABILIDAD Y LA DECISIÓN

2.1 Vulnerabilidad

Se suele entender por vulnerabilidad de un sistema la tendencia al cambio del mismo frente a acciones externas. Desde un punto de vista determinista, y suponiendo el sistema descrito por una función de estado (variables de estado), que depende de parámetros que describen la acción exterior, la vulnerabilidad queda representada por las derivadas parciales de la función de estado respecto cada uno de los parámetros. Si la descripción de las acciones exteriores es de tipo discreto, las mencionadas derivadas no tienen sentido, pero la vulnerabilidad puede describirse por las variaciones (incrementales) de la función/es de estado para cada acción externa.

Pero esta concepción presupone que, de manera determinista, una acción externa prefijada produce siempre el mismo efecto. Sea por el desconocimiento de las leyes detalladas que controlan toda la dinámica del sistema, o bien por conveniencia, es lógico adoptar una visión probabilista de la vulnerabilidad.

Asumiendo que las acciones posibles pueden describirse de manera discreta (e.g. tipos de movimiento del suelo descritos por una colección de espectros de respuesta patrón), la vulnerabilidad queda representada por las probabilidades de que, dada una acción (e.g.

movimiento del suelo de características determinadas), se produzca cada uno de los efectos o desenlaces (e.g. daños) que se suponen posibles. Si las acciones posibles se describen mediante parámetros continuos la vulnerabilidad viene expresada por una función de probabilidad dependiente del parámetro de la acción (caso de efectos en una escala discreta) o bien por una densidad de probabilidad dependiente del parámetro de la acción (caso de efectos en una escala continua).

Para formalizar algo más la definición de vulnerabilidad en el caso aleatorio, supongamos que las acciones externas que pueden alterar el sistema se denotan por a_i donde i describe un conjunto discreto de índices I ; supongamos también que los desenlaces posibles de las acciones son estados del sistema que se denotan ϕ_j donde j recorre otro conjunto discreto de índices J . Entonces, la vulnerabilidad se describirá mediante las probabilidades condicionadas

$$P[\phi_j|a_i] \quad , \quad i \in I \quad , \quad j \in J \quad , \quad (1)$$

que algunos autores denominan matriz de probabilidad de daño (e.g. Yepez et al. 1995, 1996). Si el conjunto J fuera no numerable (índice j continuo), la probabilidad en (1) sería una distribución de probabilidad condicionada o en su caso una densidad de probabilidad condicionada.

Naturalmente, el estudio de la vulnerabilidad del sistema exige que, previamente, se definan las acciones a_i y los estados aleatorios ϕ_j , para después poder estimar las probabilidades (1). Esto hace a la vulnerabilidad dependiente, no sólo del propio sistema que se estudia, sino de los desenlaces y acciones que se consideran y, por tanto, del uso que se quiera hacer de ella.

2.2 Decisión

La toma de decisiones en un contexto de incertidumbre, desde el punto de vista bayesiano (e.g. Benjamin-Cornell, 1970; Schlaifer, 1969), siempre consta de, al menos, cuatro elementos: (a) una descripción de las diferentes decisiones que pueden adoptarse, que denotaremos por d_k , donde el subíndice recorre el conjunto K ; (b) las situaciones aleatorias que pueden presentarse o estados aleatorios ϕ_j con j recorriendo J y su descripción probabilística; (c) una función $u(\phi_j, d_k)$ que asigna a cada decisión d_k y cada estado aleatorio ϕ_j una utilidad (beneficio o coste subjetivos); (d) un criterio de selección de la decisión óptima. En esta presentación supondremos que los conjuntos de índices son todos discretos, aunque no existen inconvenientes metodológicos para considerarlos continuos. Este conjunto de elementos son los que participan en el esquema de decisión *a priori*. Otros esquemas incluyen otros elementos que serán introducidos en los próximos apartados.

El conjunto de decisiones posibles, d_k , no tiene otro condicionamiento que el de ser exhaustivo. Eso quiere decir que el esquema de decisión no será capaz de crear alternativas que no hubieran sido previamente establecidas. Igualmente los estados aleatorios ϕ_j deben ser exhaustivos incluyendo todas las posibilidades de desenlace de las acciones externas al sistema. Exigen su descripción probabilística mediante las probabilidades condicionadas a la decisión

$$P[\phi_j|d_k] \quad , \quad k \in K \quad , \quad j \in J \quad . \quad (2)$$

El elemento clave es la utilidad $u(\phi_j, d_k)$. Su definición presupone que existe un tomador de la decisión, el cual tiene unas preferencias subjetivas en el resultado de la toma de decisiones. La función de utilidad se pretende que represente las mencionadas preferencias

del tomador. El tomador de la decisión puede ser una persona o conjunto de ellas, una entidad o el estado u otras instituciones.

En ocasiones se llama a la toma de decisiones análisis de coste-beneficio suponiendo que se trata de un análisis puramente económico y que, por tanto, el tomador de la decisión reacciona a los valores económicos de una forma lineal: mayor preferencia a mayor beneficio económico. Sin embargo esto no refleja la realidad de la mayor parte de los problemas de decisión. Por ejemplo, un político puede preferir una mayor inversión económica para satisfacer las demandas de seguridad de los ciudadanos que son sus propios votantes. O también, desde el punto de vista de un estado democrático, un accidente de poca envergadura económica puede generar sensaciones de inseguridad y desórdenes que perjudiquen seriamente la convivencia; tal accidente debería ser evitado.

Esto quiere decir que la definición de la función de utilidad no puede prescindir de quién o qué es el tomador de la decisión. Por ello, la función de utilidad debería ser establecida mediante una interrogación exhaustiva del tomador de la decisión; para ello existen técnicas específicas (e.g. Keeney-Raiffa, 1976). La utilidad se mide en unidades arbitrarias mediante una reducción de escalas, pero es frecuente que se haga en unidades económicas de coste.

En general suele ser conveniente la simplificación de la función de utilidad. Los modelos más simples son de tipo aditivo: se asigna una utilidad a la decisión, que se suma a la utilidad de los estados aleatorios y, a su vez, estos se descomponen en otros términos aditivos de forma que, por ejemplo, $u(\phi_j, d_k) = u_1(\phi_j) + u_2(d_k)$. Suposiciones similares se adoptarán en lo que sigue por comodidad de notación y cálculo, pero se trata de simplificaciones prescindibles.

En este breve comentario se ha dado por supuesto que se es capaz de determinar las utilidades que corresponden a los estados aleatorios ϕ_j . Como se verá este detalle es esencial para la caracterización de la vulnerabilidad.

Finalmente, debe establecerse un criterio de selección de la decisión óptima. Existen diversos criterios razonables. El más corriente es el de riesgo esperado mínimo (o utilidad esperada máxima). Consiste en seleccionar aquella decisión d_{opt} tal que

$$E[u(\Phi, d_{opt})] = \max_{k \in K} E[u(\Phi, d_k)] \quad , \quad (3)$$

donde el valor esperado se toma respecto a la variable aleatoria del estado Φ que se valora en los estados considerados ϕ_j , es decir

$$E[u(\Phi, d_k)] = \sum_{j \in J} u(\phi_j, d_k) P[\phi_j | d_k] \quad . \quad (4)$$

El opuesto al valor esperado (4) se conoce con el nombre de riesgo esperado de la decisión d_k .

En ciertas ocasiones se utiliza el criterio de selección *minimax*, que consiste en seleccionar la decisión d_{opt} tal que

$$u(\phi_{opt}, d_{opt}) = \max_{k \in K} \min_{j \in J} u(\phi_j, d_k) \quad . \quad (5)$$

Es decir, se selecciona la decisión cuya utilidad mínima es máxima.

Puede discutirse si uno u otro criterio son más o menos conservadores. Sin embargo, el criterio de selección de la decisión debe ser tenido en cuenta cuando se diseña la utilidad; de hecho, el interrogatorio del tomador se basa en ese criterio de selección (Benjamin-Cornell, 1970; Keeney-Raiffa, 1976). Por tanto, la comparación no tiene sentido. Pero si se comparan los criterios con la misma utilidad ya dada, el criterio *minimax* suele resultar en decisiones algo más conservadoras. En lo que sigue se utilizará el criterio de mínimo riesgo (3).

3 DECISIONES NORMATIVAS DE DISEÑO SÍSMICO

Los estados avanzados establecen normativas o recomendaciones para el diseño de estructuras que deban ser sismorresistentes (e.g. Paz, 1994). En ellas, junto una serie de normas generales para cada tipología de interés (centrales nucleares, otras centrales energéticas, edificios públicos, viviendas, etc.), se establecen niveles de seguridad según las zonas en que se sitúan atendiendo a criterios de sismicidad. Obviamente, en las normativas o recomendaciones no se especifica el diseño completo sino sólo algunas de sus características.

Para analizar las decisiones que se toman en las normativas antisísmicas se debe, en primer lugar, identificar al tomador de la decisión. Tratándose de una norma o recomendación estatal, el propio estado se constituye en el tomador de la decisión. Por tanto, las utilidades deberán responder a los intereses del estado, que se suponen representativos de los de los ciudadanos.

Un problema metodológico importante aparece al determinar el objeto de la decisión. Aparentemente bastaría especificarlo como *nivel de protección frente a acciones sísmicas*. Pero la tradición en el diseño antisísmico determinista lleva a la mayoría de las normativas a tomar las decisiones sobre los llamados terremotos de diseño.

Los terremotos de diseño suelen definirse por dos vías diferentes según las características de la infraestructura de que se trate. Para obras civiles de riesgo moderado suele definirse el terremoto de diseño como aquél que, en el enclave, se presenta con un cierto periodo de retorno; se supone que la obra debe resistir ese terremoto; el terremoto queda finalmente definido por algunas de sus características (intensidad macrosísmica, aceleración de pico, espectro de respuesta, etc.). En este caso la caracterización del parámetro de diseño depende de la estima de los periodos de retorno, los cuales han sido estimados en condiciones precarias en la mayoría de los casos.

En obras de mayor riesgo (e.g. centrales nucleares, presas, diques de contención del mar, etc.) suelen definirse sendos sismos de diseño, una vez más, caracterizados por su periodo de retorno en la zona. Uno de ellos sirve para exigir que su ocurrencia no interrumpa el servicio de la obra; el otro sólo exige que no se produzcan catástrofes en caso de presentarse, pero se admite que se puedan producir daños que afecten al servicio (USNRC, 1978). Como en el caso anterior la definición del parámetro de diseño queda contaminada por su relación con el periodo de retorno.

Los enfoques citados presentan un grave problema: el nexo de identificación del periodo de retorno y el terremoto de diseño es incierto y dependiente de la estimación del primero. Pero en definitiva lo que se utiliza como parámetro de diseño es la caracterización de un terremoto que se supone que la obra debe resistir. Por ello, en los últimos años se tiende paulatinamente a definir los terremotos de diseño mediante una caracterización directa del terremoto (e.g. composición frecuencial, niveles de aceleración, duración ...), es decir, por un conjunto de parámetros de diseño independientes de la ocurrencia aleatoria de los terremotos.

Debe notarse que en esta concepción tradicional del terremoto de diseño no cabe el concepto de vulnerabilidad probabilística. En efecto, si se supera el sismo de diseño, se supone que se produce el accidente que se pretendía evitar. En caso contrario no se producen daños. La experiencia en construcciones civiles demuestra, sin lugar a dudas, que esa situación dista de ser real, tanto en el sentido de la ocurrencia de fallos con acciones por debajo del diseño como viceversa. Adicionalmente, los fallos o accidentes son graduales pues son raros los sistemas que sólo admitan dos estados: servicio y colapso.

Un ejemplo puede mostrar este tipo de incoherencias. En Europa es frecuente utilizar la intensidad sísmica como medida de los terremotos debido a los abundantes catálogos

históricos y a la moderada sismicidad de muchas de sus regiones. Algunas normativas sísmicas utilizan o han utilizado un nivel de intensidad como exigencia de seguridad. La vulnerabilidad, en estos casos establece la probabilidad de que, presentada una intensidad sísmica determinada, se produzcan unos niveles u otros de daño. Pero esto es contradictorio con la definición de intensidad sísmica a partir de los efectos o daños producidos. Lógicamente debe procederse a la diferenciación de intensidad como caracterización de efectos de terremotos y la intensidad como parámetro de diseño.

De esta reflexión se deduce que debe decidirse sobre el valor de un parámetro de diseño (quizá discretizado en los valores d_k). Su característica fundamental es que, fijado su valor, se pueda conocer, a través de una fórmula u algoritmo, si una estructura corresponde al valor del parámetro de diseño. Es decir, los parámetros de diseño deben establecer una condición comprobable al diseño global de la estructura. Además, si el parámetro de diseño ha sido bien elegido, será posible establecer la probabilidad de que una cierta acción sísmica produzca unos u otros daños; en definitiva, se podrá establecer su vulnerabilidad.

En esta concepción raramente aceptada de un parámetro de diseño, nada indica que el parámetro se tenga que identificar con una aceleración, un espectro de respuesta o una intensidad sísmica. Si llega a tener una interpretación es sólo debido a la conveniencia de la intuición. En el fondo la interpretación intuitiva del parámetro de diseño debe hacerse a través de la vulnerabilidad.

Convengamos, por tanto, que se ha determinado una colección de valores del parámetro de diseño d_k con $k \in K$. Ahora deben establecerse los estados aleatorios. En el caso sísmico estándar la aleatoriedad procede de dos fuentes: el proceso sísmico en sí mismo (peligrosidad sísmica o *hazard*) y de los efectos sobre la estructura (vulnerabilidad). Pero esos dos elementos aleatorios deben combinarse para definir los estados aleatorios y sus probabilidades.

La característica de los estados aleatorios que nos conciernen es que su probabilidad debe ser estimable y que su utilidad se pueda establecer. La segunda de estas condiciones permite afirmar que los estados son las situaciones de la obra que producen utilidades (costes) diferentes. Por tanto, no se trata de definir los estados según un criterio exclusivamente estructural sino de costes (económicos, sociales, sobre servicios, sobre bienes, vidas, etc.). En cualquier caso la clasificación de estos estados está relacionada con los desenlaces de terremotos y debe ser sencilla para su posible utilización. Esto es debido a que, en caso contrario, sería necesario establecer multitud de probabilidades sobre las que, en muchas ocasiones, se dispone de escasa información.

Supongamos que, debido a una acción sísmica, la obra puede quedar en diversas situaciones asociadas a costes (utilidades); sean estas situaciones o desenlaces θ_j , $j \in J$. Supongamos también que la obra debe tener una vida útil t y denotemos por N_j el número de veces (aleatorio) que la obra queda en situación θ_j durante la vida útil t . Cada valor que puede tomar el vector aleatorio (N_1, N_2, \dots, N_J) puede considerarse un estado aleatorio que interviene en la decisión. Estos estados han sido denotados en la sección anterior por ϕ_j . Para obtener su descripción probabilista será necesario combinar la peligrosidad sísmica del enclave con la vulnerabilidad de la obra.

La peligrosidad sísmica debe establecer una clasificación simple de los posibles efectos locales de los terremotos y sus respectivas probabilidades de ocurrencia. Una manera lógica y sencilla de hacerlo es establecer diversos rangos de aceleraciones de pico del terreno y de frecuencias dominantes de la oscilación; cada una de las clases así determinadas puede identificarse con una acción sísmica a_i (índices recorriendo el conjunto I). También puede

definirse una familia de espectros de respuesta e identificar cada uno de ellos con una clase de acción a_i . En cualquier caso es importante que las definiciones anteriores permitan la estimación de los correspondientes periodos de retorno (o sus inversos λ_i) para cada clase a_i . Si se supone (hipótesis no necesaria) que la ocurrencia de las acciones obedece a un proceso de Poisson, se obtienen las probabilidades de ocurrencia mediante

$$P[M_i = m | \lambda_i] = (t\lambda_i)^m (m!)^{-1} \exp(-t\lambda_i) \quad , \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

donde M_i expresa el número de veces que ocurre la acción sísmica a_i durante la vida útil, t , de la estructura de que se trate. La esperanza de M_i es $t\lambda_i$ y el periodo de retorno asociado a la acción sísmica a_i es $1/\lambda_i$.

Supongamos ahora que la estructura ha sido diseñada con el parámetro de diseño d_k y que se han establecido las probabilidades $P[\theta_j | a_i, d_k]$. Es decir, para el diseño d_k y para la acción sísmica a_i , se supone conocida la probabilidad de que se produzca un desenlace θ_j cuya utilidad (coste) se conoce.

El número de veces que se producirá el desenlace θ_j durante la vida útil de la estructura, denotado por $N_j(d_k)$, corresponde a una variable aleatoria de Poisson cuyo parámetro es

$$\mu_j(d_k) = \sum_{i \in I} \lambda_i P[\theta_j | a_i, d_k] \quad , \quad (7)$$

y está descrita por las probabilidades de ocurrencia de θ_j :

$$P[N_j(d_k) = n | d_k] = (t\mu_j(d_k))^n (n!)^{-1} \exp(-t\mu_j(d_k)) \quad , \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Si para cada d_k las variables $N_j(d_k)$ pueden considerarse independientes (así sucede en el caso de procesos de Poisson), las probabilidades

$$P[N_j(d_k) = n_j, j \in J | d_k] = \prod_{j \in J} P[N_j(d_k) = n_j | d_k] \quad (9)$$

describen las probabilidades de los estados dada la decisión d_k (2).

Debe observarse en (7) y (8) que la vulnerabilidad resulta imprescindible para determinar la ocurrencia de costes por daños y que no basta con conocer la peligrosidad sísmica de un enclave para tomar decisiones sobre el diseño de la estructura. También puede notarse que $P[\theta_j | a_i, d_k]$ se ha utilizado (7) para describir el desenlace θ_j de un solo terremoto, como paso intermedio para describir cómodamente la probabilidad de los estados $(N_j(d_k), j \in J)$; esto forzará implícitamente a que no se consideren daños acumulados en una sucesión de terremotos, como se puede deducir de los modelos que se utilizan a continuación. Es decir, se está suponiendo que los daños, una vez producidos, se reparan antes de la eventual ocurrencia de otro suceso sísmico destructivo.

Para completar el esquema de decisión basta definir un modelo de utilidades simple (aditivo) pero flexible, capaz de representar la multitud de situaciones que se pueden presentar. Una propuesta de estas características se expone a continuación.

Se supone que la adopción de un parámetro de diseño d_k produce un sobrecoste $u_{prot}(d_k)$ (utilidad negativa) en la estructura sobre el diseño básico sin protección antisísmica. El resto de los costes están asociados a la ocurrencia de desenlaces de sucesos sísmicos θ_j . Supongamos que estos costes son funciones del número de veces $N_j(d_k)$ que ocurre θ_j . Se pueden considerar los siguientes costes: a) los producidos por reparación de averías o daños

causados; b) los producidos por interrupción de servicios que dependen de la estructura; c) los daños sobre bienes alojados o protegidos por la estructura; d) los daños sobre personas y e) los costes generados por los efectos de los posibles accidentes sobre la sociedad en general que llamaremos costes sociales.

Los costes generados por a), b) y c) pueden evaluarse de forma sencilla para cada d_k y para cada θ_j en términos económicos. Simplificando, pueden considerarse proporcionales a N_j , por lo que basta determinar el coste para un solo desenlace. Sean estos costes unitarios (utilidades negativas): $u_{rep}(\theta_j, d_k)$ para a); $u_{ser}(\theta_j, d_k)$ para b); $u_b(\theta_j, d_k)$ para c). En situaciones genéricas se podrá prescindir de la dependencia en d_k en los casos b) y c).

Los costes producidos sobre personas pueden considerarse divididos en dos partes: la puramente económica (primas de seguros, indemnizaciones, costes sanitarios) y los que dependen del impacto social. Los segundos es conveniente incluirlos en e). Los puramente económicos pueden ser tratados como en los casos anteriores a), b) y c). Se establece el número de víctimas medio y su coste asociado para cada desenlace: $u_{per}(\theta_j, d_k)$.

Los costes sociales e) son más difíciles de evaluar pues dependen de la percepción que el estado (tomador de la decisión) tiene de las situaciones de desastre social y de la propia sociedad a la que representa. Esta evaluación es una de las principales tareas de un equipo que asesore la redacción de una norma antisísmica. De hecho rara vez se explicita en la práctica, pero la promulgación de una normativa la lleva implícita. Algunos ejemplos ponen de manifiesto estos aspectos: las exigencias antisísmicas en una central nuclear no se justifican por razones económicas sino por el rechazo social que se produce en caso de accidente nuclear y sus consecuencias sociales y políticas; las exigencias de protección de obras civiles varían de unos países a otros y, en general, a mayor nivel de bienestar social y económico, mayores son las exigencias de protección; un accidente mortal no se percibe igual en la Unión Europea o en USA que en la India, en China, en Zambia o incluso en ciertas partes de Rusia.

En cualquier caso, y simplificando de nuevo, puede suponerse que los costes sociales, dados d_k y el número de veces $N_j(d_k)$ que ocurre θ_j , pueden expresarse para cada estado aleatorio según

$$u_s(N_j, j \in J, d_k) = \sum_{j \in J} \sum_{n=0}^q c_{kjn} N_j^n(d_k) \quad (10)$$

donde los coeficientes c_{kjn} son los coeficientes de un polinomio que aproxima convenientemente la dependencia de los costes sociales con el número de veces que ocurre cada desenlace θ_j . Puede notarse que los costes sociales que provienen de cada desenlace, θ_j , se han considerado aditivos en (10).

Con las simplificaciones anteriores la expresión de la utilidad para cada decisión d_k y cada estado ($N_j(d_k)$, $j \in J$) queda expresada según

$$u(N_j(d_k), j \in J, d_k) = u_{prot}(d_k) + \sum_{j \in J} N_j(d_k) [u_{rep}(\theta_j, d_k) + u_{ser}(\theta_j, d_k) + u_b(\theta_j, d_k) + u_{per}(\theta_j, d_k)] + u_s(N_j(d_k), j \in J, d_k) \quad (11)$$

Para evaluar el valor esperado de la utilidad, dada d_k , basta sustituir en (11) $N_j(d_k)$ por su esperanza $t\mu_j(d_k)$; en la parte de (11) correspondiente a costes sociales (10) aparecen las potencias de $N_j(d_k)$, cuyos valores esperados (momentos) son conocidos en el caso de procesos de Poisson.

Con ello el esquema de decisión a priori queda completo. Cálculos sencillos permiten analizar la decisión y seleccionar la óptima. La Tabla 1 representa dicho esquema.

Tabla 1. Esquema de decisión a priori para diseño antisísmico óptimo. Se utiliza la notación del texto.

Decisiones de diseño. A priori.				
Diseño	Estados aleatorios			Utilidades
	acción sísmica	desenlace	estado	(costes)
d_k	a_i	θ_j	$\Phi = N_j(d_k)$	$u(\Phi, d_k) =$
$k \in K$	$i \in I$	$j \in J$	$j \in J$	$= u_{prot}(d_k) +$ $\sum_j N_j u_{rep}(\theta_j, d_k) +$ $\sum_j N_j u_{ser}(\theta_j, d_k) +$ $\sum_j N_j u_b(\theta_j, d_k) +$ $\sum_j N_j u_{per}(\theta_j, d_k) +$ $\sum_j u_s(N_j, j \in J, d_k)$
	peligr. λ_i (Poisson)	vulner. $P[\theta_j a_i, d_k]$	$\mu_j(d_k)$ (Poisson)	
d_{opt} para $E[u(\Phi, d_k)]$ máximo				

4 UN EJEMPLO DE DECISIÓN NORMATIVA DE DISEÑO

Para ilustrar la metodología de decisiones normativas de diseño, en esta sección se muestra un ejemplo preliminar y simplificado de la misma. Se trata de determinar un parámetro de diseño (normativo) para la construcción de un edificio de viviendas (6 plantas y 100m² de planta como referencia) con una vida útil de $t = 100$ años que, también como referencia, se sitúa en Barcelona (España) en la zona conocida como Eixample. Este ejemplo no pretende establecer ningún valor concreto de parámetros o riesgo, se utiliza simplemente a nivel metodológico.

La primera cuestión a determinar es quién es el tomador de la decisión. Se supondrá que es el estado a través de la autoridad que corresponda. Esto determina el tipo de utilidades que deben tenerse en cuenta.

El objeto de la decisión es determinar el valor del parámetro de diseño. Se supondrá que este parámetro es una intensidad sísmica y con ellos se tratará el ejemplo. No obstante, como se hace en RD 2543/1994, los valores de la intensidad sísmica pueden suponerse asociados a espectros de respuesta (de diseño) preestablecidos. Supondremos que los niveles de diseño de interés recorren los valores de intensidad 6, ..., 10. Para una interpretación intuitiva de del significado de estos valores, pueden asimilarse a los de la intensidad sísmica MSK modificada y los correspondientes valores de aceleración y espectros de respuesta de diseño (RD 2543/1994); es decir, un edificio diseñado con el grado 7 se puede suponer (aproximadamente) resistente a los terremotos que localmente producen intensidades MSK de grado VII. Así, las posibilidades de elección son valores de d_k que recorren de 6 hasta 10.

Las acciones sísmicas posibles se caracterizarán por su intensidad MSK, de las cuales se pueden estimar los periodos de retorno. Por tanto los valores posibles de a_i son los grados VI, ..., X de esa escala. No existe ningún inconveniente metodológico para utilizar otra caracterización de las acciones sísmicas. Por ejemplo, rangos de aceleración máxima del terreno o aceleración de pico; incluso podría hacerse una doble caracterización por rangos de aceleración y frecuencia de pico. El único requerimiento es poder estimar adecuadamente los periodos de retorno de cada categoría (alternativamente los parámetros de Poisson λ_i). Como se indicó en la sección 3, la elección de la caracterización de las acciones sísmicas tiene una incidencia directa en el estudio de vulnerabilidad que será necesario. Ciertamente, las probabilidades $P[\theta_j | a_i, d_k]$ están condicionadas a esa caracterización.

Para la descripción probabilista de las acciones sísmicas, se ha supuesto que éstas obedecen a procesos de Poisson cuyos periodos de retorno ($1/\lambda_i$) se han tomado de Egozcue et al. (1991) prescindiendo de la incertidumbre de los mismos; la Tabla 2 muestra los valores correspondientes. Se han elegido estos valores de periodos de retorno que son relativamente cortos respecto a los comúnmente aceptados, para comparar los resultados que se obtengan con los establecidos en RD 2543/1994.

Tabla 2. Periodos de retorno (medios estimados) en Barcelona de las intensidades MSK. Se presentan los valores acumulados por rangos superiores de los periodos de retorno y los correspondientes parámetros de Poisson. Según Egozcue et al. (1991).

Periodos de retorno de intensidades MSK in Barcelona, España		
Int. MSK	periodo ret.	λ
5	17.71	0.0565
6	58.09	0.0172
7	335.4	2.98×10^{-3}
8	637.1	1.57×10^{-3}
9	2×10^5	5×10^{-6}
10	10^6	10^{-6}

Antes de modelar la vulnerabilidad de los edificios de referencia es necesario establecer los desenlaces que se consideran después de una acción sísmica (denominados en la sección 3 por θ_j). Es importante que estos desenlaces correspondan a utilidades (costes) diferenciados. Por este motivo se ha acudido a una descripción grosera de los mismos. Se consideran 6 desenlaces diferentes (siguiendo a Park et al. 1985) que se especifican en la Tabla 3 junto con los costes asociados por reparación, por interrupción de servicio, por daños a bienes y por daños económicos de accidentes de personas.

Se ha tomado el coste de construcción (por cada planta) de 100m^2 de superficie habitable, que se supone $c_0 = 150,000\text{\$}$, como referencia para el diseño básico con protección para los terremotos de intensidad de diseño de grado inferior a 6 (sin protección sísmica).

Los costes de construcción se incrementan a medida que se aumenta el nivel de exigencia en el diseño antisísmico. Sin embargo, no existe una experiencia contrastada de estos

sobrecostos en la tipología de edificios elegida en Barcelona. Se ha optado por una modelización muy simple de estos costos. Suponiendo que se incrementan cuadráticamente hasta que, para el diseño de intensidad 10, se duplica el coste de construcción. Identificando el subíndice k con la intensidad de diseño se tiene

$$c_0(d_k) = c_0 \left(1 + \frac{(k-5)^2}{25} \right), \quad k = 5, \dots, 10. \quad (12)$$

Tabla 3. Descripción de los desenlaces de un terremoto θ_j (referencia al índice global de Park et al. 1985). Costes asociados a reparaciones, daños sobre bienes y costes económicos sobre personas. También se presentan los valores de los coeficientes $c_{kj2} = c_{j2}$ que definen los costes sociales.

Descripción y parámetros de coste de los desenlaces						
(Park)	Descripción	Repar $\times c_0(d_k)$	Bienes $\times c_0(d_k)$	Servic $\times c_1$	Personas $\times c_2$	Social c_{j2}
$\theta_1(0.00)$	sin daños apreciables	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$\theta_2(0.05)$	sin daño estructural	—	—	—	—	—
	daños otros elementos	0.015	0.005	—	0.005	10^4
$\theta_3(0.15)$	daño estruct. ligero	0.100	—	0.020	—	—
	daños otros elementos	0.030	0.020	—	0.010	5×10^4
$\theta_4(0.35)$	daño estruct. moderado	0.300	0.050	0.800	0.010	10^5
	daño otros elementos	0.050	0.050	—	0.010	10^5
$\theta_5(0.67)$	daño estruct. severo	1.200	0.100	1.000	0.100	5×10^5
	daño otros elementos	0.200	0.100	—	0.300	5×10^5
$\theta_6(1.00)$	colapso	1.800	0.500	2.000	4.000	10^7

Los costes de protección, de reparación y sobre bienes se tomarán como tantos por uno de esta cantidad (12). La referencia para los costes por interrupción de servicios (inhabitabilidad del edificio) será el coste estimado de alojamiento de una persona durante un año; se ha tomado este valor 15,000\$. Además se supone que en Barcelona, en promedio, viven 5 personas por 100m². Por tanto, la cantidad final de referencia será $c_1 = 70,000\$$; bastará determinar el periodo de desalojamiento de la vivienda para estimar el coste del periodo de desalojo. Para los daños (económicos) sobre personas tomamos el coste económico de una defunción desde el punto de vista del estado: atención sanitaria-funeraria, indemnización y cese en la producción. En una aproximación grosera estimamos estos términos en 10,000(\$), 100,000(\$), 100,000(\$), el último de los cuales es relativamente bajo por la situación de desempleo en un país como España. Es decir se toma como referencia el coste económico por defunción de una persona $c_2 = 210,000\$$. Bastará especificar el número esperado de defunciones (los heridos se consideran como fracciones).

Los costes de carácter social son difíciles de aproximar si no se consulta al tomador de la decisión (el estado). En una primera aproximación podemos asegurar que estos costes aumentan radicalmente con la repetición de sucesos desastrosos pues está en juego el

prestigio del estado como salvaguarda de los ciudadanos, de los diseñadores en su conjunto, la confianza del conjunto de la población, etc... De aquí que se propongan unos costes sociales que se incrementan cuadráticamente con el número de veces que se producen daños. Dado que la percepción ciudadana sobre cuál fue el diseño inicial del edificio es muy escasa, se supondrá que estos costes no dependen del nivel de diseño inicial d_k . Por otra parte, las múltiples consecuencias de accidentes sísmicos hacen que estos costes se deban suponer mayores que los costes económicos que generan. Los coeficientes c_{kjn} de la ec. (10) se han considerado nulos salvo los c_{kj2} ; a su vez, su valor es el mismo para todos los k 's. Sus valores, dependientes de θ_j , se han detallado en la Tabla 3.

Tabla 4. Vulnerabilidad de edificios porticados con vigas. Se presentan las probabilidades de cada desenlace posible θ_j condicionado a la acción sísmica a (intensidad macrosísmica) y el diseño adoptado d (grados de intensidad de diseño). Las probabilidades se suponen dependientes sólo de la diferencia entre d y a .

Vulnerabilidad de edificios porticados con vigas			
Probabilidad del desenlace θ_j dado el grado de diseño y la intensidad de la acción			
θ_j	$a = d$	$a = d + 1$	$a \geq d + 2$
θ_1	0.900	0.094	0.010
θ_2	0.100	0.150	0.050
θ_3	0.000	0.600	0.100
θ_4	0.000	0.150	0.200
θ_5	0.000	0.005	0.340
θ_6	0.000	0.001	0.300

Para establecer un modelo de vulnerabilidad es necesario especificar claramente la tipología del edificio de que se trata. Se ha supuesto que se trata de un edificio de 6 plantas porticado y con vigas transversales. Los modelos de vulnerabilidad de estructuras adaptados a las decisiones de diseño han sido escasamente estudiados. No obstante se pueden aprovechar algunos resultados obtenidos por simulación presentados en Yépez et al. (1996), Barbat et al. (1996) y Yépez (1996) para esta tipología en Barcelona. Los autores citados basan sus simulaciones en la definición del índice de vulnerabilidad (introducido previamente por diversos autores (Benedetti et al., 1988; Benedetti y Petrini, 1984; y recogido por GNDT-1986) cuya principal aplicación es la descripción de la calidad sismoresistente de edificios ya construidos. Por ello el nivel de diseño antisísmico no queda explicitado y, por otra parte, se refieren esencialmente a daños estructurales. Pero en Yépez et al. (1996) puede suponerse que el nivel de diseño utilizado es la intensidad 6 ó 7. Los autores, obtienen por una extensa y detallada simulación numérica las probabilidades de daño dada una acción sísmica asociada a los grados de diseño especificados en RD 2543/1994. Aunque estos resultados incluyen edificios simulados de diversos índices de vulnerabilidad puede suponerse que

el índice de vulnerabilidad del edificio que se diseña también será variable por deficiencias en el diseño concreto, por reformas que afecten a la estructura, etc. Por tanto aceptamos esos resultados. Además, suponemos que esas probabilidades no dependen de la acción sísmica a_i y el diseño d_k sino solamente de su diferencia en grados de intensidad. Consideraremos tres casos: la intensidad de la acción coincide con la de diseño ($a = d$); la acción supera en un grado el diseño ($a = d + 1$); la acción supera en más de un grado el diseño ($a \geq d + 2$). Así se refleja en la Tabla 4 que puede considerarse inspirada en Yépez et al. 1996. Sin embargo, la adopción de estos valores debiera ser objeto de una profunda revisión.

Los parámetros contenidos en las Tablas 2, 3 y 4 contienen toda la información necesaria para proceder a la toma de decisiones sobre el nivel del diseño antisísmico requerido. Puede notarse aquí la gran flexibilidad para la modelización de muy diversas situaciones sin necesidad de cambio del esquema metodológico.

Los resultados del análisis de la decisión se presentan en la Figura 1. En ella se representa el coste esperado (riesgo) de cada decisión de diseño. El mínimo se alcanza en el diseño de intensidad 7. En la misma Fig. 1 se han representado por separado las contribuciones al riesgo total de los distintos conceptos que contribuyen: costes de construcción o protección, por inhabilitación de vivienda (servicio), por daños a bienes, por daños económicos sobre personas y por conceptos sociales.

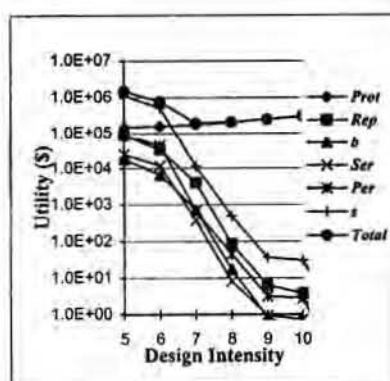


Figura 1. Resultado del análisis de la decisión sobre el nivel de protección antisísmica. Costes esperados (riesgo) (*total*) para cada nivel de diseño: óptimo en nivel 7. Se representan cada una de las componentes del riesgo: protección (*prot*); reparación (*rep*); sobre bienes (*b*); servicios (*ser*); económico sobre personas (*per*); sociales (*soc*).

Puede observarse que lo que hace que la decisión óptima sea el nivel 7 y no el 6 es el coste social considerado y no otros costes económicos. La normativa española actual (RD 2543/1994) prevé para Barcelona un nivel equivalente al 7 aquí utilizado, pero este nivel es actualmente objeto de controversia por considerarse elevado. De hecho ese nivel se obtiene con una estima de los periodos de retorno mucho menos conservadora que la aquí utilizada. Pero en el ejemplo presentado se muestra claramente que el elemento clave para decidir entre el nivel 6 ó 7 son los mencionados costes sociales; en la normativa mencionada no se tienen en cuenta de manera explícita esos costes. Se plantea, por tanto, el estudio de una decisión tan importante como la mencionada. El esquema de decisión a priori presentado permite este análisis, mientras que las normativas de muchos países la dificultan seriamente.

5 DECISIONES CONCERNIENTES A PRIMAS DE SEGUROS FRENTE A RIESGO SÍSMICO

El tipo de esquema de decisiones que se pretende presentar en esta sección introduce una novedad respecto al anterior que se ha llamado *a priori*. Se trata de que la información disponible en el esquema se actualiza a partir de otra nueva adquirida a través de algún tipo de experimento o ensayo. La decisión se toma después de incorporar la información obtenida; de aquí el nombre de esquema *a posteriori*. Desde el punto de vista probabilístico, la nueva información o resultado del experimento permite, utilizando la fórmula de Bayes, modificar las probabilidades que describen los estados según haya sido el resultado experimental (e.g. Benjamin-Cornell, 1970; Robert, 1994; Press, 1989). Al cambio de las probabilidades de los estados aleatorios le corresponden valores actualizados de los riesgos esperados de cada posible decisión y, por tanto, pueden conducir a una decisión óptima diferente a la que se hubiera tomado antes de realizar el experimento.

En definitiva, el esquema de decisión es el mismo que *a priori* pero, adicionalmente, se realizan uno o varios experimentos que permiten cambiar la descripción probabilística de los estados. Para formalizar esto supongamos que *a priori* se conocen las probabilidades de los estados denotadas, igual que en la sección 2 (2), por $P[\phi_j|d_k]$. Supongamos así mismo que se realiza un experimento cuyos posibles resultados denotamos r_s , donde el índice s recorre el conjunto de valores S .

Para que el experimento dé alguna información acerca de los estados aleatorios ϕ_j , se debe llegar a establecer las probabilidades de los estados, condicionadas ahora al resultado experimental; es decir, si se ha obtenido el resultado r_s necesitamos conocer $P[\phi_j|d_k, r_s]$. Estas nuevas probabilidades reemplazarán a las $P[\phi_j|d_k]$ en el esquema de decisión. El cálculo de estas nuevas probabilidades se realiza tradicionalmente mediante la fórmula de Bayes:

$$P[\phi_j|d_k, r_s] = \frac{P[r_s|d_k, \phi_j] P[\phi_j|d_k]}{\sum_{n \in J} P[r_s|d_k, \phi_n] P[\phi_n|d_k]} \quad , \quad j \in J \quad (13)$$

En (13) aparecen las probabilidades $P[r_s|d_k, \phi_j]$ que, cuando se especifican para los valores de $j \in J$, $k \in K$ y $s \in S$, constituyen la descripción probabilística del experimento que se realiza. Muy frecuentemente los experimentos no dependen de la decisión d_k que pueda tomarse y puede suprimirse el condicionamiento respecto a d_k . Debe, además, notarse que esta descripción permite utilizar experimentos que sólo informan vagamente sobre el estado o, contrariamente, experimentos fuertemente informativos. Si, por ejemplo, fijados s y k , las probabilidades $P[r_s|d_k, \phi_j]$ son iguales para cada ϕ_j , el resultado experimental r_s no aporta ninguna información y la fórmula (13) no modifica la probabilidad del estado. Si, al contrario, una de estas probabilidades para un cierto ϕ_j es 1 y para los demás es 0, la probabilidad (13) es 1; esto indica que la información obtenida ha eliminado la incertidumbre acerca del estado y la decisión se toma de forma determinista.

En el ámbito del riesgo sísmico el esquema de decisión *a posteriori* se adapta perfectamente a la decisión que debe tomar una compañía de seguros para establecer los precios de pólizas de seguros contra daños sísmicos sobre una vivienda. Supongamos, como en la sección 4, que se trata de una vivienda situada en un edificio de varios pisos y la prima del seguro debe cubrir todos los posibles daños sobre el edificio quedando excluidos los daños a personas y al contenido del mismo.

Repasemos los elementos del esquema de decisión expuesto en la sección 4 y las modificaciones que debemos tener en cuenta. En primer lugar el tomador de la decisión es ahora la compañía de seguros que en principio responde solamente a intereses económicos. Las

decisiones posibles que consideramos son sólo los diferentes niveles de la cuota anual de la póliza que identificamos con los d_k . Por cuestiones de simplicidad excluimos las diferentes modalidades de póliza (franquicias, limitación de la indemnización, etc.) y las posibilidades de reaseguro de la propia compañía.

La decisión sobre los precios a establecer está ahora sometida, al menos, a tres tipos de situaciones inciertas: a) la ocurrencia de terremotos destructivos, b) la vulnerabilidad del edificio y c) la situación de la demanda de pólizas de seguros contra sismos. Las dos primeras coinciden sustancialmente con las presentadas en las secciones 3 y 4; la última debe tenerse en cuenta para no perder cuota de mercado: precios demasiado elevados son disuasivos, precios demasiado bajos pueden someter a la compañía a pérdidas enormes en caso de accidentes. Por tanto, los estados aleatorios a considerar pueden ser, como en el caso anterior, el número de veces que ocurre cada uno de los desenlaces θ_j en un año (duración de la póliza) y además un descriptor de la demanda de este tipo de pólizas que denotamos genéricamente por ψ . Así los estados aleatorios quedan descritos por $(N_j, j \in J; \psi)$, donde N_j representa el número de veces (aleatorio) que ocurre del desenlace θ_j en un año.

Las utilidades pueden también seguir un esquema semejante al de las secciones 3 y 4, pero serán necesarias algunas modificaciones significativas. Los costes de construcción no juegan ningún papel específico; en realidad son sustituidos por el valor máximo que puede tomar la indemnización en caso de destrucción o ruina de la vivienda. Las indemnizaciones por daños parciales pueden fijarse mediante porcentajes del valor total y deben definir los posibles desenlaces de un suceso sísmico. Puede notarse que la definición de los desenlaces θ_j usada en la sección 4 debe ser alterada para adaptarla al caso que se estudia. Por ejemplo, el hecho de que no se contemplen daños sobre personas o contenidos de la vivienda hace que los daños graves sobre la estructura sean equivalentes al colapso de la misma, pues desde el punto de vista de la compañía aseguradora la indemnización será la máxima pactada.

Los costes generados por inhabilitación temporal de la vivienda y bienes no juegan ningún papel. Sin embargo, la compañía debe plantearse la valoración de la utilidad de sus beneficios por póliza anual en contraste con la competitividad de su producto en el mercado. La competitividad de las pólizas ofertadas viene condicionada al estado de demanda de ese tipo de pólizas (cuyo descriptor, ψ , se ha incluido en los estados aleatorios). A su vez, la demanda puede considerarse ligada, no sólo a cuestiones económicas, sino a la sensibilización social debida a desastres sísmicos recientes. No entraremos en la discusión de los posibles modelos a utilizar acerca de estos detalles. Basta tener en cuenta que si sólo se consideran beneficios fijos por póliza, la decisión óptima (cuota de la póliza) sería, obviamente, el coste esperado de las indemnizaciones más el beneficio que se desea obtener en cada póliza.

De forma similar a la sección 3, podemos suponer que la utilidad correspondiente a d_k y al estado aleatorio tendrá una expresión como

$$u(N_j, j \in J, \psi, d_k) = u_c(\psi, d_k) + u_{ind}(N_j, j \in J) \quad , \quad (14)$$

donde u_c es la utilidad del valor de la cuota para la compañía de seguros y u_{ind} la utilidad o coste que para la compañía supone el pago de indemnizaciones. Análogamente a (10), se puede suponer que

$$u_{ind}(N_j, j \in J) = \sum_{j \in J} \sum_{n=0}^q c_{jn} N_j^n \quad . \quad (15)$$

El problema a resolver se reduce al cálculo del valor esperado de (14-15) dado d_k . El primer sumando de (14), el único que depende de d_k , no será estudiado aquí. El segundo,

aceptada la expresión polinómica (15), exige el conocimiento de los momentos $E(N_j^n)$; todos ellos dependen exclusivamente del parámetro de Poisson con que ocurren los desenlaces θ_j , y éste se calcula, análogamente a (5), según

$$\mu_j = \sum_{i \in I} \lambda_i P[\theta_j | a_i] \quad , \quad (16)$$

donde λ_i representa el número medio anual de acciones sísmicas de tipo a_i .

El esquema de decisión que hasta ahora se ha descrito es *a priori* y, una vez establecidas las probabilidades de los estados, produciría la misma decisión óptima cualquiera que fuese la vivienda asegurada o la situación de la demanda de pólizas. No obstante, es práctica común efectuar inspecciones de los bienes asegurados antes de pactar las condiciones de una póliza. También las compañías aseguradoras regulan los precios de sus productos en función de estudios de mercado que realizan para tal fin. Es decir, antes de tomar la decisión definitiva, se realizan experimentos que aportan información acerca de los estados considerados. En lo que sigue nos referiremos a la descripción probabilística de la inspección del edificio; la metodología es análoga si se desea introducir el resultado de un estudio de mercado.

Supongamos que se recibe la solicitud de suscripción de una póliza de seguros contra daños sísmicos para una vivienda situada en un edificio de la tipología brevemente descrita en la sección 4, es decir, varios pisos con estructura porticada, de hormigón armado y con vigas. En una primera aproximación *a priori*, puede suponerse que la vulnerabilidad del edificio responde a la prevista en la decisión de diseño presentada en la sección 4. Solamente debería tenerse en cuenta que los estados θ_5 (daños estructurales severos) y θ_6 (colapso) son, en este planteamiento, equivalentes.

La inspección del edificio debería permitir estimar con mayor precisión las probabilidades de la vulnerabilidad $P[\theta_j | a_i]$ que aparecen en (16). Se ha suprimido la dependencia en la decisión d_k porque en este caso la cuota que se establezca no altera la vulnerabilidad del edificio.

Las inspecciones pueden realizarse de diversas formas, pero en general consisten en valorar diversos parámetros cuantitativos y cualitativos de la calidad del diseño del edificio y su estado de conservación. La combinación adecuada de estos parámetros puede dar lugar a un índice de vulnerabilidad (e.g. Benedetti-Petrini, 1984; GNDT-1986; Yépez et al. 1995). Por tanto el resultado de la inspección puede ser la determinación del valor de ese índice para el edificio de que se trate. Aunque los índices de vulnerabilidad utilizados proceden todos de los utilizados por Banedetti-Petrini (1984), no existe dificultad en concebir otros métodos de calificación del estado del edificio a partir de observaciones de inspección; sea cual sea el modelo empleado aquí se utilizará siempre el nombre genérico de índice de vulnerabilidad.

Cabe ahora la discusión acerca de si un cierto índice de vulnerabilidad es adecuado o no. En primer lugar, cada tipología de edificios o estructuras exige la utilización de un índice diferente; por tanto nos referimos al que se aprecie adecuado al caso que nos ocupa. La cuestión a dilucidar es qué características son deseables en esos índices para nuestros propósitos.

Los criterios a exigir a un índice de vulnerabilidad en el marco de estas decisiones pueden reducirse a tres:

- **Observabilidad:** que la inspección sea rápida, económica y no destructiva. Que los parámetros sean fácilmente observables.

- *Descripción probabilística:* para el uso riguroso del índice será necesario poder estimar la probabilidad de cada valor del índice dados una acción sísmica y el desenlace del mismo para el edificio considerado.
- *Información:* que la evaluación del índice permita reducir la incertidumbre acerca de su vulnerabilidad en la mayor medida posible.

Los índices de vulnerabilidad gozan, en general, de buenas propiedades de observabilidad pues han sido diseñados para ello. Mucho más exigentes son las condiciones que impone su descripción probabilística y la evaluación de su capacidad informativa. Por ello merecen una atención específica.

En general, la fórmula de actualización bayesiana (13) no será necesario aplicarla en la forma indicada, donde puede observarse que intervienen las probabilidades $P[r_s|d_k, \phi_j]$ que son de difícil interpretación. En realidad estas probabilidades sólo son necesarias para calcular el valor esperado de la utilidad dada cada decisión posible. Pero para ello basta sustituir la fórmula (16) por

$$\mu_j = \sum_{i \in I} \lambda_i P[\theta_j | r_s, a_i] \quad , \quad (17)$$

que considera el resultado de la inspección r_s (valor del índice de vulnerabilidad) a través del condicionamiento en la probabilidad del desenlace θ_j .

Teniendo en cuenta (17), concluimos que para la actualización de la decisión después de la inspección basta conocer $P[\theta_j | r_s, a_i]$ para cada valor de los subíndices, es decir, la probabilidad de los desenlaces dadas la acción sísmica y el índice de vulnerabilidad. Estas probabilidades son las más frecuentemente estudiadas, ya sea a partir de observaciones de daños producidos por terremotos o por simulación (Benedetti et al., 1988; Yépez et al., 1996; Yépez, 1996). Debe notarse que sin este estudio probabilístico de un índice de vulnerabilidad, éste resulta inútil a los efectos que nos ocupan.

Es interesante evaluar la capacidad informativa de un índice de vulnerabilidad. Para ello tampoco son necesarias las probabilidades $P[r_s|d_k, \phi_j]$. Para mostrarlo podemos describir la incertidumbre respecto al desenlace de la acción sísmica a_i antes de realizar la inspección (evaluación de índice) mediante la entropía (negativa) de Shannon (1948)

$$H(\theta_j, j \in J | a_i) = - \sum_{j \in J} P[\theta_j | a_i] \log(P[\theta_j | a_i]) \quad . \quad (18)$$

Una vez realizada la evaluación del índice, el resultado obtenido, r_s , reduce la incertidumbre según

$$H(\theta_j, j \in J | a_i, r_s) = - \sum_{j \in J} P[\theta_j | r_s, a_i] \log(P[\theta_j | r_s, a_i]) \quad , \quad (19)$$

de donde la información aportada por el resultado r_s es la diferencia entre (18) y (19). La información ponderada que se obtiene al evaluar el índice será:

$$\sum_{i \in I} P[a_i] \sum_{s \in S} P[r_s] (H(\theta_j, j \in J | a_i) - H(\theta_j, j \in J | a_i, r_s)) \quad . \quad (20)$$

En (20) queda manifiesto que la información aportada por la evaluación del índice depende tanto de las probabilidades $P[\theta_j | r_s, a_i]$, que caracterizan el índice, como de la zona geográfica en donde se aplica. En efecto, la zona está representada en (20) por $P[a_i]$, que refleja la sismicidad, y por $P[r_s]$ que representa la calidad de las construcciones de la zona.

La expresión (20) evalúa la calidad del índice desde una perspectiva puramente informativa y no tiene en cuenta el valor de la información recibida. Desde el punto de vista de una compañía de seguros, la calidad del índice se podría medir modificando (20) para introducir el riesgo de a_i en lugar de $P[a_i]$. También se puede evaluar la calidad del índice utilizando las ideas del análisis *preposterior* que se presentan en la sección 6.

Finalmente, se concluye que el estudio de índices de vulnerabilidad tiene gran importancia pero que su utilización rigurosa exige la estimación de las probabilidades $P[\theta_j|r_s, a_i]$, que una vez más están ligadas al contexto de decisiones en que se desea utilizar el mencionado índice de vulnerabilidad.

6 DECISIONES EN LA MITIGACIÓN DE ACCIDENTES SÍSMICOS

Nos referiremos ahora al problema de toma de decisiones que corresponden a la movilización y actuación de equipos de mitigación de daños producidos por accidentes sísmicos. Ello nos conducirá al esquema de decisiones llamado *preposterior*. Estos esquemas se caracterizan porque, además de tomar decisiones sobre la actuación el equipo de mitigación, también se toman sobre la forma de obtener información (i.e. sobre los experimentos a realizar). La incorporación de la nueva información procedente de los experimentos puede modificar las decisiones de actuación; de esta forma, aplicando el sistema de forma iterada se llega a una toma dinámica de decisiones susceptible de guiar las decisiones que, en tiempo real, debieran tomar los responsables del equipo de mitigación. El desarrollo completo del ejemplo que se expondrá queda fuera de las posibilidades presentes de exposición, pero será utilizado para analizar el papel que pueda jugar la vulnerabilidad de los diferentes sistemas implicados.

Para fijar ideas nos referiremos a un equipo especializado en el salvamento de personas atrapadas en edificios colapsados. Supondremos también que el equipo es dirigido a distancia por un responsable que toma las decisiones de actuación y recaba la información necesaria. Además supondremos que se trata de un equipo que no está permanentemente movilizado, sino que la mayoría de sus componentes son localizables en cualquier momento para su agrupación (movilización) y posterior despliegue y actuación.

Por tanto las decisiones que deben tomarse consisten en seleccionar actuaciones entre un conjunto potencialmente extenso de ellas. Sin pretensión exhaustiva se pueden dar ejemplos de actuación: agrupamiento en el cuartel general (movilización); desmovilización; desplazamiento del punto actual al punto X siguiendo el recorrido A; retroceder al punto anterior; esperar en el punto actual; desplegarse en la zona para buscar el objetivo; actuar sobre un objetivo (edificio colapsado); abandonar actuación; disolver el equipo para apoyar otros equipos. Puede seguir un largo etcétera. Denotamos este conjunto de alternativas por d_k con $k \in K$.

Obviamente estas actuaciones serán adecuadas en función de situaciones aleatorias o estados ϕ_j con $j \in J$. Los estados estarán compuestos de diversas variables aleatorias, entre las que podemos destacar: lugar de posible colapso; realidad del colapso y sus características (inexistente, total, parcial, presencia de fuego, escapes de fluidos); número de personas atrapadas vivas y muertas; accesibilidad de los enclaves; vías de transporte expeditas, interrumpidas o con dificultades; descubrimiento de otros colapsos que exigen mayor urgencia. Nuevamente se puede ampliar la lista de posibles estados que afecten al resultado de las decisiones. Todos estos estados pueden modelarse probabilísticamente

cuando se ha producido un terremoto en cierta zona (a posteriori del terremoto y a priori de otras circunstancias).

Fijada una actuación d_k y un estado ϕ_j puede adjudicarse una utilidad; esencialmente estará compuesta de los costes económicos y sociales de la actuación. No es fácil establecer ese modelo de utilidades pues debería representar las preferencias de la población y por tanto debe resolver preguntas tales como: ¿Cuán útil es rescatar un cadáver de un edificio mientras se abandona un edificio contiguo colapsado en donde podría haber sobrevivientes? ¿Cuál es el coste de enviar al equipo de salvamento a un lugar erróneo? ¿Es positivo movilizar un equipo no necesario para que la población se sienta segura? ¿Cuál es el coste de una baja por accidente entre los miembros del equipo de salvamento? En cualquier caso, establecer estos modelos de utilidad es materia de investigación cuando se establece un plan de actuación. Supongamos por tanto que las utilidades son conocidas.

Con los elementos mencionados (actuaciones d_k , estados ϕ_j descritos por $P[\phi_j|d_k]$ y utilidades $u(d_k, \phi_j)$) se puede proceder a tomar una decisión a priori. Sin embargo, la enorme incertidumbre acerca de los estados llevaría indefectiblemente a la decisión de no movilizar el equipo o, a lo sumo, a su agrupamiento en caso de registrarse un terremoto. Sólo la obtención de nueva información permitirá una actuación ulterior.

La cuestión que se plantea ahora es seleccionar la mejor manera de obtener la nueva información. El responsable del equipo debe seleccionar un canal de información (o combinación de ellos) entre los diversos posibles. Entre estos posibles experimentos pueden destacarse: comunicación (recepción o llamada) telefónica con privados en la zona posiblemente afectada; comunicación radiofónica/telefónica con instituciones oficiales de la zona; despliegue de equipos de inspección; inspección aérea; imágenes obtenidas por satélites; análisis sísmológicos detallados (localización y magnitudes precisas; señales de acelerómetros de la zona), consulta del padrón de un edificio, etc. Denotemos a las posibles combinaciones de estos experimentos e_t , $t \in T$.

Cada experimento e_t puede producir un conjunto de resultados que denotamos r_{ts} con $s \in S_t$. Deben incluirse resultados tan poco informativos como "las líneas telefónicas no funcionan" o "no hay ningún helicóptero disponible". En general debemos esperar que los resultados de los experimentos no sean concluyentes respecto al estado que se desea conocer. Por ejemplo, una llamada telefónica anunciando el colapso de un edificio vecino no implica directamente la veracidad de la información: puede ser producto del pánico o una simple broma de mal gusto. Por tanto, para utilizar el resultado obtenido será necesario disponer tanto del propio resultado del experimento como de la modelización probabilística del mismo (como se indicó en la sección 5 eq. (13)).

Para decidir sobre qué experimento realizar, se considera un nuevo esquema de decisión en el que se trata de seleccionar un e_t óptimo. La decisión está sometida a la incertidumbre sobre el resultado que se obtendrá de cada posible experimento, r_{ts} , cuyas probabilidades $P[r_{ts}]$ pueden ser establecidas a priori o posteriori. Para tomar una decisión acerca de e_t será necesario asignar una utilidad al par e_t, r_{ts} . En general, puede considerarse que la realización del experimento e_t tiene un coste inherente (-utilidad, $-u(e_t)$) al cual debe añadirse la utilidad de la información que pueda aportar. Esta última utilidad se calcula suponiendo que se ha obtenido el resultado r_{ts} ; esto permite actualizar las probabilidades de los estados ϕ_j y tomar (supuestamente) la decisión óptima a posteriori sobre d_k que tiene asociada la utilidad esperada $E[u(d_k, \Phi)|r_{ts}]$. Finalmente, al experimento e_t y el resultado r_{ts} se les asocia la utilidad $u(e_t) + E[u(d_k, \Phi)|r_{ts}]$. Con ello se ha construido un nuevo esquema de decisión a priori (a posteriori) para decidir sobre el experimento e_t a realizar.

Hallado el óptimo se procede a la realización efectiva del experimento y, una vez obtenido el resultado, se toma la decisión sobre la actuación d_k que ya ha sido precalculada. El ciclo se repite decidiendo sobre un nuevo experimento. La Tabla 5 presenta un esquema de este proceso. Cada ciclo del proceso lo constituye un esquema de decisión *preposterior*.

Ahora podemos preguntarnos qué papel juegan los diferentes conceptos ligados a la vulnerabilidad en este esquema. Son destacables al menos dos aspectos diferentes aunque conceptualmente similares. El primero de ellos hace referencia a la definición del escenario. El ejemplo anterior presupone que existen unos equipos de salvamento y mitigación dotados de vehículos e instrumental con cuarteles generales determinados. Obviamente las dotaciones y emplazamientos son objeto de otras decisiones (no mencionadas anteriormente) pero de extrema importancia. Las decisiones sobre la constitución de equipos son esencialmente decisiones a priori y obedecen a esquemas similares al presentado en la sección 3. En ellos la vulnerabilidad de zonas urbanas y de líneas de comunicación constituye el grueso de los estados aleatorios a considerar.

Tabla 5. Esquema de decisión pre-posterior. Su utilización iterada proporciona un sistema de decisiones dinámico acerca de las actuaciones óptimas de un equipo y de los canales de información adecuados en cada momento.

Esquema pre-posterior de decisiones				
⇒	Análisis de utilidad de experimentos y preselección de actuaciones			
	Actuación d_k	Estados ϕ_j $P[\phi_j d_k, r_{ts}]$	Utilidad $u(\phi_j, d_k)$	⇒ Óptimo $d_k = d_{opt}(r_{ts})$ $E[u(\Phi, d_{opt}(r_{ts}))]$ ↓
	⇐	⇐	⇐	⇐
↓				
⇒	Selección de experimentos			
	Experimento e_t	Resultado r_{ts} $P[r_{ts} e_t]$	Utilidad $u(e_t) +$ $+E[u(\Phi, d_{opt}(r_{ts}))]$	⇒ Óptimo $e_t = e_{opt}$ ↓ ↓ Realización e_{opt}
	⇐	Result. $r_{opt,*}$	⇐	⇐
↓	Decisión sobre la actuación			
⇒	$d_{opt}(r_{opt,*})$ con utilidad media $E[u(\Phi, d_{opt}(r_{opt,*}))]$			

En este caso, no se trata de vulnerabilidad de un edificio o un puente sino de sistemas más complejos. En general los desenlaces de las acciones sísmicas sobre estos sistemas no pueden clasificarse en la misma forma que se hace para un edificio. De ahí que las probabilidades de la vulnerabilidad o los modelos intermedios que puedan utilizarse no son comparables a los mencionados en las secciones anteriores. No obstante, la vulnerabilidad específica de los elementos de una zona urbana o de una carretera pueden ser útiles para obtener una evaluación estadística de la vulnerabilidad de los sistemas globales (Benedetti et al. 1988).

El segundo aspecto en el que ha aparecido implícitamente la vulnerabilidad es el referente a la adopción de probabilidades a priori de los estados. En el momento que se detecta un terremoto y se pone en funcionamiento el esquema de decisiones sobre experimentos y actuaciones, es necesario iniciar el proceso con un modelo probabilístico a priori de los estados ϕ_j . Es decir, es necesario conocer las probabilidades de ϕ_j dada la acción sísmica; éstas son las que definen la vulnerabilidad de una zona y de las líneas de comunicación correspondientes. Debe notarse la moderada importancia de la determinación de estos prioris, puesto que, iniciada la realización de experimentos en el esquema *preposterior*, la información aportada por los mismos es mucho más detallada que la aportada por una evaluación a priori de la vulnerabilidad de los sistemas implicados.

Estos dos aspectos de la vulnerabilidad de sistemas urbanos y de comunicaciones tienen afortunadamente características parecidas, por lo que puede considerarse que el estudio de ambas vulnerabilidades puede hacerse conjuntamente. Incluso es posible evaluarlas estadísticamente a partir de descripciones de la vulnerabilidad de algunos o cada uno de los elementos que componen el sistema. Pero una vez más es necesario insistir en que, sin un diseño previo de los esquemas de decisión en los que se utilizará la vulnerabilidad, cabe la posibilidad de que los estudios de vulnerabilidad que se efectúen sean inútiles en la práctica.

7 CONCLUSIONES

Del análisis de diversos escenarios donde interviene el concepto de vulnerabilidad sísmica, se desprende que ésta adquiere sentido estricto cuando se analiza en un contexto de toma de decisiones sometidas a incertidumbre. Estas decisiones pueden tener carácter y objetivos muy diversos. Se han ejemplificado tres escenarios que implican, directa o indirectamente, el estudio de la vulnerabilidad sísmica de un sistema. En los dos primeros el sistema era un edificio u obra civil individual; en el último se trataba de sistemas compuestos de multitud de elementos simples (zonas urbanas, líneas de comunicaciones).

El estudio de la vulnerabilidad de cualquier sistema implica una definición exhaustiva de las acciones sísmicas a que puede verse sometido y de los desenlaces a los que aquellas acciones pueden dar lugar. Los desenlaces a considerar en un escenario dependen de la utilidad que se defina para cada desenlace. Esto convierte a la vulnerabilidad en un modelo del sistema fuertemente dependiente de la aplicación en donde deba utilizarse.

Se ha caracterizado (en sentido probabilístico) la vulnerabilidad de un sistema sometido a acciones sísmicas como la probabilidad de que, dada una acción sísmica, se produzca un cierto desenlace. En la literatura sobre el tema, se han definido y utilizado diferentes modelos de vulnerabilidad; entre ellos destacan los índices de vulnerabilidad (Benedetti-Petrini, 1984). Los índices de vulnerabilidad pueden concebirse con dos finalidades diferentes: como parámetros intermedios para establecer la vulnerabilidad de un sistema y, como se ha mostrado, como medio para obtener información acerca de la vulnerabilidad de sistemas parcialmente conocidos. En ambos casos, el estudio probabilista de la evaluación del índice es imprescindible para una utilización rigurosa del mismo.

Tiene especial interés la evaluación de los índices de vulnerabilidad. Se ha mostrado que la capacidad informativa de un índice puede estar condicionada tanto al propio sistema como a la zona geográfica en donde se va a utilizar.

Los esquemas bayesianos de decisión han permitido insertar los conceptos más usuales de vulnerabilidad en una visión global de problemas de ingeniería sísmica con un contexto

metodológico coherente. Este marco permite analizar el papel de la vulnerabilidad en cada toma de decisiones.

Se han presentado y ejemplificado, desde un punto de vista metodológico, los tres esquemas básicos de toma de decisiones: *a priori*, que permite tratar problemas como las decisiones de diseño de edificios y obras civiles, o como la distribución y dotación de equipos de mitigación de daños; *a posteriori*, en los que se incluye la incorporación de nueva información sobre la vulnerabilidad del sistema (e.g. inspecciones previas a la determinación de primas de seguros o las decisiones sobre declaraciones de ruina de edificios); *preposteriores* en los que la incorporación reiterada de información acerca de sistemas complejos permite guiar una toma de decisiones de carácter dinámico (e.g. actuación de equipos de mitigación de daños).

Se concluye que es necesario profundizar en estos aspectos metodológicos para lograr que los esfuerzos que se están realizando en los estudios de vulnerabilidad sísmica conduzcan a una base de conocimiento útil y coherente.

AGRADECIMIENTOS

Parte del presente trabajo se basa en un proyecto financiado por Puertos del Estado (España) y el Centro Internacional de Investigación de Recursos Costeros (CIIRC) (Barcelona, España). El contenido de este trabajo fue el tema de un seminario invitado por el Instituto de Sismología del ETH de Zürich (Suiza). Algunas de las ideas presentadas provienen de las discusiones en el seno del Proyecto Europeo SERGISAI.

REFERENCIAS

- Barbat, A.H., F. Yépez y J.A. Canas (1996), Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones, *Earthquake Spectra*, **12**, 3, 371-393.
- Benedetti, D. y V. Petrini (1984), Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura i proposte di un metodo di valutazione, *L'industria delle Costruzioni*, **149**, 66-77.
- Benedetti, D., G. Benzonì y M. Parisi (1988), Seismic vulnerability and risk evaluation for old urban nuclei, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **16**, 2, 183-201.
- Benjamin, J.R. y C.A. Cornell (1970), *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, McGraw Hill, New York.
- Cohrane, S.W. y W.H. Schaad (1992), Assessment of earthquake vulnerability of buildings, *Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Vol. 1, 497-502.
- Egozcue, J.J., A. Barbat, J.A. Canas, J. Miquel y E. Banda (1991), A method to estimate intensity occurrence probabilities in low seismic activity regions, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **20**, 1, 43-60.
- GNDT-1986, *Istruzioni per la compilazione della scheda di rilevamento, esposizione e vulnerabilità sismica degli edifici*, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Regione Emilia Romana, Italia.

- Kappos, A., K. Pitilakis, K. Stylianidis y K. Morfidis (1995), Cost-benefit analysis for the seismic rehabilitation of buildings in Thessaloniki, based on a hybrid method of vulnerability assessment, *Proc. 5th International Conference on Seismic Zonation*, Nice, France, Vol. 1, 406-413.
- Keeney, R.L. y H. Raiffa (1976), *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, J. Wiley & Sons, New York.
- Noceski, N. y J.T. Petrovski (1994), Analytical vulnerability functions of earthquake resistant and non-resistant buildings, *Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Vol. 2, 1099-1103.
- Park, Y.J., A.H.S. Ang y Y.K. Wen (1985), Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings, *Journal of Structural Division, ASCE*, **111**, 740-757.
- Paz, M. (1994), *International Handbook of Earthquake Engineering*, Chapman & Hall, New York.
- Press, S.J. (1989), *Bayesian Statistics*, J. Wiley, New York.
- RD 2543/1994, Norma sismoresistente NCSE-1994, *Boletín Oficial del Estado*, **33**, Madrid, diciembre 1994.
- Robert, C.P. (1994), *The Bayesian Choice*, Springer Verlag, New York.
- Singhal, A. y A.S. Kiremidjian (1996), A method for probabilistic evaluation of seismic structural damage, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, **122**, 12, 1459-1467.
- Schlaifer, R.O. (1969), *Analysis of Decisions under Uncertainty*, MacGraw Hill, New York.
- Shannon, C. (1948), A mathematical theory of communication, *Bell System Tech. J.*, **27**, 379-423 and 623-656.
- USNRC (1978), *Seismic and Geological Siting Criteria for Nuclear Power Plants*, Part 100, Reactor Siting Criteria, Title 10, Code of Federal Regulations: Energy, **10 CFR**, **100**, Appendix A, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- Yépez, F. (1996), Un esquema probabilista de estimación de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras, *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, **1**, 2, 145-177.
- Yépez, F., A.H. Barbat y J.A. Canas (1995), *Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmica de edificios de mampostería*, CIMNE IS-12 1995, Barcelona, España.
- Yépez, F., A.H. Barbat y J.A. Canas (1996), *Evaluación probabilista de la vulnerabilidad y riesgo sísmico de estructuras de hormigón armado por medio de simulación*, CIMNE IS-20 1996, Barcelona, España.